



超高速ネットワークにおける多段スイッチ網の構成法に関する研究

著者	小原 仁
号	202
発行年	2001
URL	http://hdl.handle.net/10097/12897

氏 名 (本籍)	お ばら ひとし 小 原 仁 (岩手県)
学位の種類	博 士 (情報科学)
学 位 記 番 号	情 博 第 202 号
学位授与年月日	平成13年9月13日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) システム情報科学専攻
学位論文題目	超高速ネットワークにおける多段スイッチ網の構成法に関する研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 根元 義章 東北大学教授 西関 隆夫 東北大学教授 堀口 剛 東北大学助教授 加藤 寧

論文内容要旨

1 緒論

近年、インターネットを始めとする通信ネットワークにおける加入者数の増加と通信速度の高速化の進展が目覚ましい。この需要を満たす超高速ネットワークが求められており、光ファイバ伝送システムの高速化とともに、ノードで用いられるSDH (Synchronous Digital Hierarchy) やATM (Asynchronous Transfer Mode) などの各種の通信方式に対応した交換システムや多重化システム (クロスコネクトシステム) の大容量化が必須である。これらのノードシステムを経済的に実現するためには、その主要な機能である回線設定を担う大容量スイッチ網を効率的に構成する必要がある。

クロスバー構成に代表される一段構成のスイッチ網は、回路規模がスイッチサイズの二乗に比例して増大するため大規模化が困難である。この問題を解決するため、回路規模が小さく増設に適した多段スイッチ網が広く用いられてきた。中でも、Closが提案した多段空間スイッチ網は実用性に優れており、空間分割型交換方式に長く用いられてきた。一方、最近のデジタルネットワークで用いられている主要な多段スイッチ網は、Closの構成法との等価変換やアナロジーから導出されたものが多い。しかし、これらのアプローチでは適用される通信方式に固有の要求条件を十分考慮しておらず、必ずしも最適な多段スイッチ網が得られないという問題があった。このため、ATMや波長多重 (Wavelength-division multiplexing, WDM) などを含む各種の通信方式に共通に適用可能な多段スイッチ網の構成法を確立することが必要である。さらに最近の通信トラフィックの急増に対処するため、Closの多段構成を凌ぐ効率的な多段スイッチ網の構成法が求められている。

本研究は、超高速ネットワークを経済的に実現するための重要な技術課題である大容量スイッチ網に関し、多段化のアプローチによる効率的な構成法の確立を目的に行ったものである。多段スイッチ網に要求される機能条件は広範囲に及ぶため、本研究では対称構造であり、ノンブロックな1対1接続機能を有するものについて特に論じる。本研究の特色は、各種の多重方式に適用可能な多段スイッチ網の基本的な構成概念の探求から始まり、次いでそれをTDM方式、ATM方式、WDM方式などに適用して各種の新たな多段スイッチ網を提案して、その特性を理論的に詳細に論じた点にある。

2 多段スイッチ網の基本構成概念の提案

本論文の第2章では、既知の代表的な多段スイッチ網を対象にその特徴を整理し、それらの背景にある

基本的な構成概念について考察した。この結果から、最も基本となる1段のクロスバー型スイッチ構成を起源とし、主要な多段スイッチ網であるClosスイッチ、Cantorスイッチ、Pippengerスイッチなどが体系的に関連付けられることを明らかにした。ここで基本となる多段スイッチ網の構成概念は、スイッチ機能を分散および収束機能に分解して考えることと、それらの間に中間スイッチ段階を導入してトラヒックを中間スイッチに対応するグループに細分化することにより、必要となるスイッチサイズを小型化するというものである。提案する構成概念は既知の多段空間スイッチ網より導出されたものであるが、トラヒックをフローと見ることにより、従来の代表的な多段ATMスイッチ網や多段WDMスイッチ網にも適用できることを示した。なお、スイッチ網は小規模なスイッチ回路を多数接続して得られる網状の構成と定義される。以下の議論はすべて多段スイッチ網を対象としており、特に断りのない限り単にスイッチと呼ぶ。

3 TDMスイッチの多段構成法の提案と特性評価

第3章の前半では、クロスバー型の空間スイッチに対応する時間スイッチ(T-SW)のマトリクス構成を起点とし、第2章で提案した構成概念を適用して2段STスイッチを新たに提案した。スイッチ回路規模を最小とするため、ポインター形式のアドレス制御法を提案した。スイッチ制御の複雑さについても検討し、STスイッチは再配置数が最大でも1となる再配置型スイッチとなることを明らかにした。回路規模および制御の複雑さを考慮した適用領域は、既存の3段TSTスイッチと同様に広い領域をカバーする可能性があることを示した。

第3章の後半では現在のデジタル網に広く用いられている3段TSTスイッチを対象に、スイッチ制御の高速化の面から検討した。最初に、現在広く用いられている再配置制御法は空間スイッチを対象として導出されたものであり、時間領域での動作条件を考慮すると最適ではないという問題点を初めて指摘した。再配置制御の高速化のためには再配置パス探索時間を低減することが有効であることを指摘し、この観点から新たな再配置制御法を提案した。典型的なスイッチ構成条件において、提案方法は非効率な再配置パス探索処理を除去することにより、平均処理時間を約50%低減できることを計算機シミュレーションにより明らかにした。また、再配置が早期に終了する確率の高い処理ルーチンを優先することにより、再配置パス数も平均で20%程度削減可能となり、全体として再配置制御の高速化が図れることを定量的に明らかにした。本研究結果の一部はSDHネットワークのクロスコネクトシステムに採用された。

4 ATMスイッチの多段構成法の提案と特性評価

第4章の前半では、ATMスイッチの中で最も実用性の高い出力バッファ構成を対象に、効率的に大容量化が図れる多段構成法について検討した。第2章で提案した構成概念を適用し、多段出力バッファ型ATMスイッチを新たに提案した。提案する構成の性能を理論的に解析した結果、2段ないし3段構成が最も効率的であることを明らかにした。次に、その実現性を検証するためプロトタイプ装置の試作を行った。これにより、僅かな規模のバッファの追加により、理想的な出力バッファスイッチとほぼ同等の特性を有する大容量ATMスイッチ(最大容量80Gb/s)が実現できることを示した。以上の結果より、提案構成法の有効性が確認できた。本ATMスイッチは、AT&Tベル研究所との共同研究として行われたものである。その後、改良が加えられ、ATMバックボーンネットワークにて実用化された。

第4章の後半ではマルチパスルーチングに基づく多段バッファ型ATMスイッチにおける2つの主要な問題点を解決した。第一の問題はキューイング用のバッファが増大することであり、これを解決するため多段スイッチ網の前半部分を空間スイッチ回路で実現する構成法を新たに提案した。この方法は第2章で提案した構成概念をベースとしている。第二の問題はマルチパスルーチングに特有のセル順序逆転の発生である。本研究ではタイムスタンプ方式を適用し、簡易な分散制御によりセル順序逆転が防止できるとともに、タイムスタンプ長は8ビット程度で十分であることを理論的に明らかにした。また、計算機シミュレーションに

より正常に動作することを確認した。本研究結果はその後、他研究者により正当性が検証されるとともに、その一部が I P / A T M 統合スイッチの試作機に応用された。このように本研究は多段バッファ型スイッチ構成法に関して先駆的な役割を果たした。

5 自己ルーチングスイッチの多段構成法の提案と特性評価

第5章の前半では、多段スイッチの有力な応用形態である自己ルーチングスイッチにスポットを当て、その最適な構成法について検討した。最初に、C l o s スwitchの自己ルーチング性能の限界について考察し、それを用いた従来の自己ルーチングスイッチの問題点を明らかにした。この検討結果より、最も適用範囲の広いC l o s スwitchが自己ルーチング性の面では大きく劣ることを明らかにした。次に、第2章で提案した多段スイッチ構成概念に基づき、バイトニックソータを用いた新たな自己ルーチングスイッチを提案した。提案するスイッチの規模はスイッチサイズを N とした場合、 $O(N(\log N)^3)$ となる。従来の代表的な自己ルーチングスイッチであるB a t c h e r - B a n y a n スwitchと性能を比較した結果、スイッチサイズが16以下では最小のスイッチ規模となる他、単一種類のスイッチモジュールで構成され、拡張性に優れることを明らかにした。

第5章の後半では、最近研究が盛んとなっているI P - o v e r - W D M方式における波長ルーチングスイッチの研究の一環として行われた。ここでは、WDMネットワークの主要な特性劣化要因である光信号のクロストーク特性の観点から、最適な多段スイッチの構成法について考察した。最初に、1次クロストークを最小とする波長ルーチングスイッチの構成条件を理論的に明らかにした。すなわち、スイッチサイズを N 、スイッチ段数を m とした場合の最適なスイッチモジュールのサイズは $\sqrt[m]{N}$ で与えられる。この最適条件において、クロストーク量は $O(N)$ から $O(\ln N)$ に低減できることを理論的に明らかにした。さらに、 $N \times N$ スイッチの収容率を下げ、 $N^{1-1/m} \times N^{1-1/m}$ のスイッチとして用いることにより、実質的にクロストークフリーな波長ルーチングスイッチを実現できることを理論的に証明した。次に、実際の光デバイスの製造誤差を考慮した場合の提案構成の実現性について、実際のデバイスモデルに基づいて評価した。本研究で明らかにした最適な構成パラメータを採用することにより、デバイス誤差の影響を1 dB程度に抑圧できることを明らかにした。

6 結論

6章では、本論文で明らかにした研究内容とその意義について示すと共に、残された課題と今後の展望について述べた。簡単に総括すると、本論文では各種の通信方式に適用される多段スイッチ網を空間スイッチとのアナロジーから導出する従来方法に代わり、多段スイッチの基本的な構成概念の確立を背景として導出するアプローチを提案した。次に、その応用について検討し、TDM方式を始めとしてATM方式やWDM方式までもカバーする広い範囲に亘って有効であることを明らかにした。本論文で新たに提案した多段スイッチは多くの面で従来構成の性能を凌駕し、その一部は実用システムに採用された。これより、本研究は多段スイッチの構成原理の確立と、実用システムへの応用の両面で大きな寄与を果たした。

本研究では同一種類のスイッチ素子を用いた多段構成法について検討したが、スイッチ回路規模をさらに削減するため異質なスイッチ素子の組み合わせによる構成法を今後の課題として挙げた。また、本研究はスイッチ網がノード内に集中的に配置される形態を想定したが、現在研究が進められているWDMネットワークは分散された多段スイッチ網と捉えることができ、本研究成果の応用の可能性についても指摘した。

論文審査の結果の要旨

通信ネットワークが大規模化し、高速化するに伴い、スイッチ網の大容量化が求められている。大容量スイッチを実現するため、スイッチの多段化が図られているが、その構成法は多重化方式に依存しており、統一的な構成法は得られていない。著者は、超高速ネットワークにおける各種の多重化方式に共通に適用可能な多段スイッチ網の構成法を確立することを目的として研究を進め、多くの成果を得た。本論文は、これらをまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、多段空間スイッチの構成原理について検討を加え、多段スイッチ網をトラヒックの分散機能部分と収束機能部分、およびトラヒックフローを制御する中間スイッチ部分の組み合わせとして考えることにより、構成原理の体系化が可能であることを示し、各種の多重化方式に共通に適用できる多段スイッチ網の基本構成法を与えている。これは重要な成果であり、高く評価できる。

第3章では、多段TDMスイッチ網の構成法について論じ、まず第2章で示した基本構成法を用いて2段時間スイッチを設計し、回路規模やノンブロック条件を評価することにより、その有用性を明らかにしている。ついで多段TDMスイッチの高速な再配置制御法を与え、提案法の処理の複雑さと再配置数の関係を計算機シミュレーションを用いて評価し、その適用領域を明らかにしている。これまでに時間領域でのスイッチ制御を考慮した最適な構成法はなく、本章で得られた成果は高く評価できる。

第4章では、ATMスイッチの多段構成法について論じ、第2章で提案している基本構成法に基づき、既存の多段バッファ型ATMスイッチ網には未だ改良する余地のあること、および多段化に伴って発生するセル順序逆転の可能性を指摘し、その解決法を与えている。さらに、2段出力バッファ型ATMスイッチを新たに設計し、理論解析および計算機シミュレーションを用いた性能評価により、大容量スイッチ網として適していることを述べている。このスイッチ網は大容量ATMスイッチとして実用化されており、高く評価できる。

第5章では、超高速スイッチ動作に適合する自己ルーチング型多段スイッチ網について論じ、第2章で示した基本構成法を基に、バイトニックソータを用いた新たな自己ルーチング型空間スイッチ網を提案している。さらに、波長領域における自己ルーチングスイッチ網として、光信号の波長によりルーチングが自動的に定まる新たな自己ルーチングスイッチ網を提案している。これら提案方法は超高速スイッチを実現するうえで有望な技術である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、高速化、大規模化する通信ネットワークにおいて不可欠な大容量スイッチ網の設計法について検討を加え、多重化方式に共通して利用可能な設計法を与え、その有用性を実証したもので、システム情報科学および情報通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。